

# Heizsysteme und Mikroklima im Abferkelstall aus der Sicht der Wärmeübertragungstheorien und der Kosten

Von Heinz Stuhmann, Gießen\*)

DK 631.22:697.2:636.082.35

Für die Klimagegestaltung in einem Abferkelstall sind die unterschiedlichen Ansprüche von Sau und Ferkel zu berücksichtigen. Dadurch ist es notwendig, daß für die Ferkel besonders bei einstreuloser Haltung innerhalb der Abferkelbucht ein Bereich geschaffen wird, der ihren Wärmeansprüchen gerecht wird.

Ein Vergleich der bekannten Heizsysteme, wie Flüssiggas-Infrarotstrahler, Elektro-Infrarotstrahler und Fußbodenheizung ist nur sinnvoll, wenn der Wärmeaustausch zwischen Heizsystem und Tier ermittelt wird.

Unter der Verwendung der allgemein gültigen Wärmeübertragungstheorien für die Wärmestrahlung, Konvektion und Wärmeleitung und der im Versuch gewonnenen Temperaturverteilungen ist es möglich, neben den Gesamtkosten der Heizsysteme ihre Wirksamkeit zu bestimmen.

## 1. Einleitung

Die in den letzten beiden Jahren verstärkt in den Vordergrund getretene Flüssiggas-Infrarotstrahlerheizung für den Liegebereich der Ferkel innerhalb eines Abferkelstalles wird noch nicht überall im Vergleich zu den bisher verwendeten Heizungen, wie Elektrostrahler und Fußbodenheizung richtig beurteilt. Hiermit soll deshalb der Versuch unternommen werden, durch eine theoretische Betrachtung der Temperaturverhältnisse und der auftretenden Wärmeströme für die verschiedenen Heizungen aus physikalischer Sicht zu einer vergleichenden Beurteilung zu gelangen. Ohne zunächst auf die Kosten und die erzielten Wirkungen einzugehen, sollen die Wärmeströme bei den verschiedenen Heizungen betrachtet werden.

Es ergibt sich dabei sogleich eine Schwierigkeit, und zwar die Erfassung der unterschiedlichen Wärmeströme; denn wir haben Wärmeströme in Form der Wärmeleitung, der Konvektion und der Strahlung, wobei jeweils noch ein Austausch zwischen Heizung, Tier und Umgebung stattfindet.

Allgemein betrachtet können aber die folgenden Gleichungen angewendet werden:

$$\text{Wärmeleitung} \quad \dot{Q}_L = \lambda \cdot A \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x}$$

$$\text{Konvektion} \quad \dot{Q}_K = \alpha \cdot A (\vartheta_u - \vartheta)$$

$$\text{Strahlung} \quad \dot{Q}_{\text{Str}} = A_1 \cdot \frac{C_s}{\epsilon_1 + \left(\frac{1}{\epsilon_w} - 1\right)} \left[ \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right]$$

Eine Berechnung ist nur dann möglich, wie aus den Gleichungen ersichtlich, wenn die Koeffizienten  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\epsilon$  und die Temperaturen bekannt sind und außerdem die Verhältnisse des Wärmeaustausches zwischen Heizung und Tier, Heizung und Umgebung sowie Tier und Umgebung durch die o.a. Gleichungen richtig wiedergegeben werden.

## 2. Methodik und Berechnungen

Eine Methode gerade den letzteren Punkt zu lösen, ist die Festlegung von Kontrollräumen. Hierbei bietet sich folgendes an:

1. Kontrollraum um das Tier
2. Kontrollraum mit konstanten inneren Bedingungen um den Kontrollraum Tier
3. Kontrollraum mit denselben konstanten inneren Bedingungen wie in Kontrollraum 2 um die Heizung.

Der Kontrollraum um das Tier umfaßt auch die Liegefläche des Tieres, deren Größe von der aufliegenden Fläche des Tieres bestimmt wird.

Somit gehört auch der speziell aufgebaute Untergrund zum Tierkontrollraum.

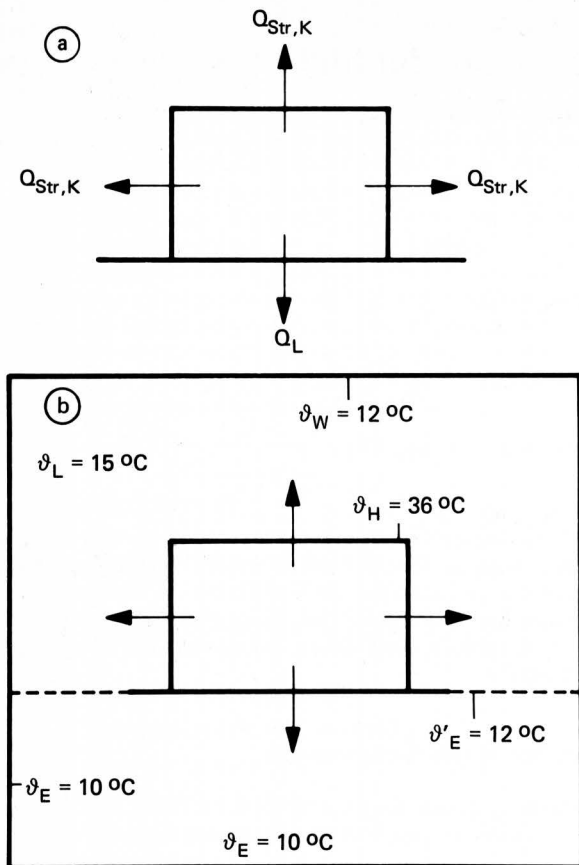
Die Verknüpfung der für die Kontrollräume 2 und 3 ermittelten Wärmeströme gibt dann den Wärmeaustausch zwischen Heizung und Tier wieder. Die Kombination der Kontrollräume 2 und 3 läßt außerdem die Berechnung der für das Tier nicht genutzten Wärmeströme der Heizung innerhalb des Kontrollraumes zu. Hierauf wird aber nicht speziell eingegangen, da für eine Beurteilung zunächst der Wärmeaustausch Heizung – Tier von Bedeutung ist. Betrachten wir also zunächst die Wärmeströme aus dem Kontrollraum für das Tier, **Bild 1a**. Der Betrag der eingezeichneten Wärmeströme läßt sich dann einfach errechnen, wenn wir den Kontrollraum "Tier" in einen Kontrollraum mit konstanten Bedingungen setzen, **Bild 1b**. Es sind hier folgende Größen als konstant angenommen:

$\vartheta_W = 12 \text{ }^\circ\text{C}$	Wand- bzw. Deckentemperatur des Stalles auf der Innenseite
$\vartheta_L = 15 \text{ }^\circ\text{C}$	optimale Lufttemperatur für die Sau im Abferkelstall
$\vartheta_E = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ $\vartheta_{E'} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$	Temperaturen im Erdreich
$\vartheta_H = 36 \text{ }^\circ\text{C}$	neutrale Temperatur eines neugeborenen Ferkels
$A_{Af} = 0,05 \text{ m}^2$	Aufliegefläche des Ferkels
$A_{Of} = 0,1 \text{ m}^2$	freie Oberfläche des Ferkels.

Für dieses System (Kontrollraum Tier in Kontrollraum 2) lassen sich nun die einzelnen Wärmeströme aus dem Kontrollraum Tier ermitteln.

Die angegebenen Messungen wurden von Dr. R. Pflug und Dipl.-Ing. H. Stuhmann durchgeführt.

\*) Dipl.-Ing. Heinz Stuhmann ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Landtechnik (Direktor: Prof. Dr. H. Eichhorn) der Justus Liebig-Universität Gießen.



**Bild 1.** Modell zur Berechnung der vom Tier ausgehenden Wärmeströme.  
a) Arten der Wärmeabfuhr aus dem Kontrollraum "Tier"  
b) Für die Wärmeabfuhr aus dem Kontrollraum "Tier" maßgebende Temperaturen im umgebenden Kontrollraum 2.

## 2.1 Berechnung der vom Tier ausgehenden Wärmeströme

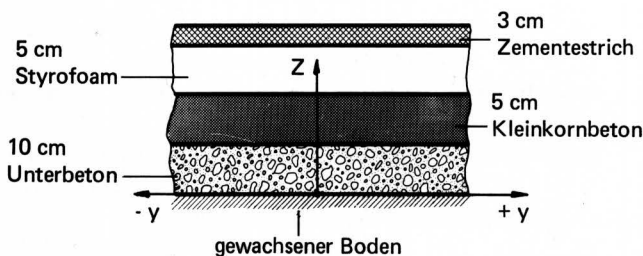
### 2.1.1 Wärmeleitung

$$\dot{Q}_L = \frac{\lambda_B}{\delta} \cdot A_{Af} \cdot (\vartheta_H - \vartheta_E)$$

Der Wert der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_B$  des Bodens läßt sich aus dem Schichtaufbau des Untergrundes ermitteln.

Der Boden besteht entsprechend **Bild 2** aus 4 Schichten:

1. Zementestrich  $\delta_1 = 2 \text{ cm}$   $\lambda_1 = 1,4 \text{ W/K m}$
2. Styrofoam  $\delta_2 = 5 \text{ cm}$   $\lambda_2 = 0,03 \text{ W/K m}$
3. Kleinkornbeton  $\delta_3 = 5 \text{ cm}$   $\lambda_3 = 1,51 \text{ W/K m}$
4. Unterbeton  $\delta_4 = 10 \text{ cm}$   $\lambda_4 = 0,64 \text{ W/K m}$



**Bild 2.** Aufbau des Bodens bei den Temperaturmessungen und Grundlage der wärmetechnischen Berechnungen.

Mit diesen Werten und den zuvor gemachten Angaben errechnet sich ein Wärmestrom durch Leitung in Größe von  $\dot{Q}_{LZ} = 0,05 \cdot 26/1,87 = 0,695 \text{ W}$ .

Die Berechnung für die weiter seitlich fließenden Wärmeströme kann entfallen, da diese insgesamt nicht mehr als 0,3 W betragen. Es ist also ein Wärmestrom infolge Wärmeleitung von insgesamt ca. 1,0 W vorhanden.

### 2.1.2 Wärmestrahlung

$$\dot{Q}_{Str} = A_1 \cdot \frac{C_s}{\frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{1}{\epsilon_w} - 1\right)} \cdot \left[ \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right]$$

Vereinfachend kann man dafür auch schreiben

$$\dot{Q}_{Str} = a_{Str} \cdot A (\vartheta_H - \vartheta_W),$$

wobei

$$a_{Str} = \frac{\dot{q}}{T_H - T_W} = \frac{C_s}{\frac{1}{\epsilon_1}} \cdot \frac{\left(\frac{T_H}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_W}{100}\right)^4}{T_H - T_W}$$

ist. Mit den für den Kontrollraum angegebenen Werten  $a_{Str}$  und  $\epsilon_1 = 0,95$  wird  $a_{Str} = 5,65 \text{ W/m}^2\text{K}$  und die Wärmeabgabe des Ferkels infolge von Strahlung  $\dot{Q}_{Str} = 13,6 \text{ W}$ .

### 2.1.3 Wärmekonvektion

Für die Berechnung des Wärmestromes infolge von Konvektion sind die entsprechenden Modellgesetze anzuwenden, aus denen der Koeffizient  $a$  des Wärmeübergangs bestimmt werden kann. Für das dargelegte System kann man davon ausgehen, daß es sich um den Fall der natürlichen Konvektion handelt, so daß dafür die Grashof-Zahl und die Prandtl-Zahl zu bestimmen sind, aus deren Verknüpfung sich dann die Nusselt-Zahl ermitteln läßt und damit auch der Wert für  $a$ .

Betrachtet man die entstehende Strömung bei waagerechten Flächen, so kann folgendes Gesetz angenommen werden.

$$Nu = \frac{a \cdot b}{\lambda} = 0,41 (Gr \cdot Pr)^{1/4}$$

$$Gr = \frac{g \beta \Delta \vartheta b^3}{\nu^2}$$

dieses Gesetz hat Gültigkeit für  $10^5 < Gr \cdot Pr < 10^8$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad \beta = \frac{1}{T_{St}}$$

$$\vartheta_{St} = 0,5 (\vartheta_H + \vartheta_U)$$

$$\Delta \vartheta = (\vartheta_H - \vartheta_U)$$

$$b = 0,1 \text{ m}$$

$$\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\lambda_{L,15^\circ\text{C}} = 0,0253 \text{ W/K m}$$

mit diesen Stoffwerten wird:

$$Gr = 3,07 \cdot 10^6$$

$$Pr = 0,7115$$

$$Gr \cdot Pr = 2,18 \cdot 10^6 \text{ liegt also im Gültigkeitsbereich.}$$

Es ergibt sich weiter:

$$(Gr \cdot Pr)^{1/4} = 38,4$$

$$Nu = 15,8; \quad a = 3,99 \text{ W/m}^2\text{K und}$$

$$\dot{Q}_K = 3,99 \cdot 0,1 \cdot 21 = 8,37 \text{ W.}$$

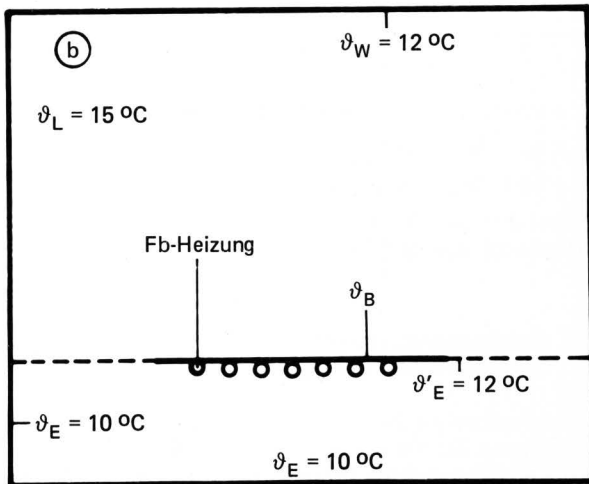
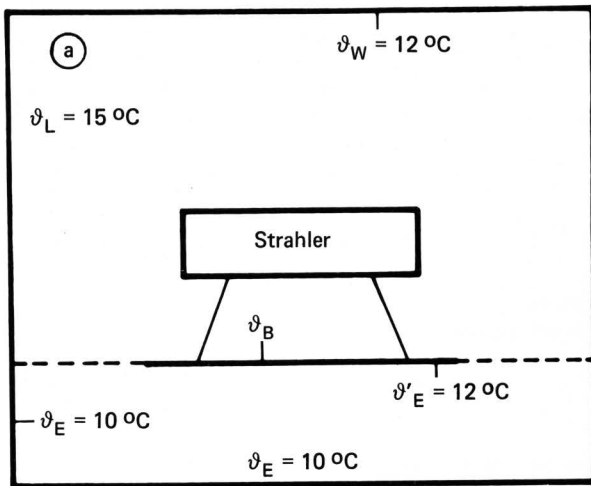
Somit sind alle aus dem Kontrollraum Tier gehenden Wärmeströme ermittelt. Insgesamt werden abgegeben:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{Str} + \dot{Q}_K + \dot{Q}_L = 13,6 \text{ W} + 8,4 \text{ W} + 1,0 \text{ W} = 23,0 \text{ W}$$

## 2.2 Randbedingungen und Berechnungen für die Heizungen

Die Aufgabe der verschiedenen Heizungen soll es sein, diese Wärmeverluste des Tieres auf ein Minimum zu reduzieren. Bei der Ermittlung der von der jeweiligen Heizung ausgehenden Wärmeströme ergeben sich meßtechnische Probleme. Stellt man jedoch die Temperaturen fest, unter den gleichen äußeren Bedingungen, am Boden und in der Luft, wie sie für die Berechnungen beim Tier gelten haben – im Aufenthaltsbereich des Tieres, aber ohne Tierbesatz – so kann man davon ausgehend die Wärmeströme berechnen. Hierbei ermittelt man die Wärmeabgaben eines dem Tier flächengleichen Bodenstückes unter den durch die Heizung entstandenen Bedingungen, d.h. Bodentemperatur und Lufttemperatur. **Bild 3a und 3b** zeigen die Temperaturverhältnisse im Kontrollraum 3. Ein Unterschied in dem Berechnungsgang für die Strahlerheizungen und die Fußbodenheizung ist allerdings noch zu vermerken. So wird für die Strahlerheizungen angenommen, daß auch ein Tier, welches im Heizbereich dieser Heizung liegt, die für diesen Bodenbereich geltende Temperatur erreicht. Bei der Berechnung für die Fußbodenheizung hingegen, wird eine Temperatur an der Bodenoberfläche von  $36\text{ °C}$  = Oberflächentemperatur des Tieres angenommen, da nur unter diesen Bedingungen keine Wärmeleitung vom Tier aus in den Boden erfolgt. Erst bei Temperaturen, die über  $36\text{ °C}$  liegen, kann das Tier vom Boden her aufgeheizt werden. Meßergebnisse für die Fußbodenheizung lagen nicht vor, jedoch die Meßergebnisse der Boden- und Lufttemperatur für die beiden Strahlerheizsysteme.

Ausgehend von den in **Bild 4 bis 8** dargestellten Meßwerten erfolgt die Berechnung.

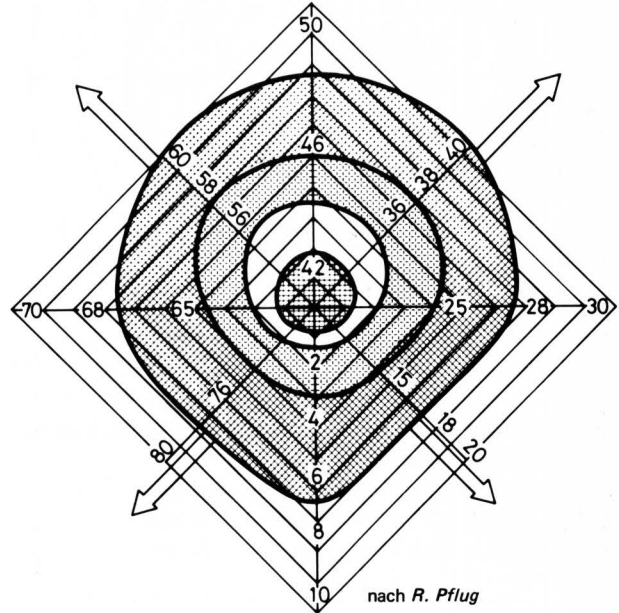


**Bild 3.** Kontrollraum mit Einschluß der Heizungen.

- a) Strahlerheizung  
b) Fußbodenheizung

## 2.2.1 Flüssiggas-Infrarotstrahlerheizung

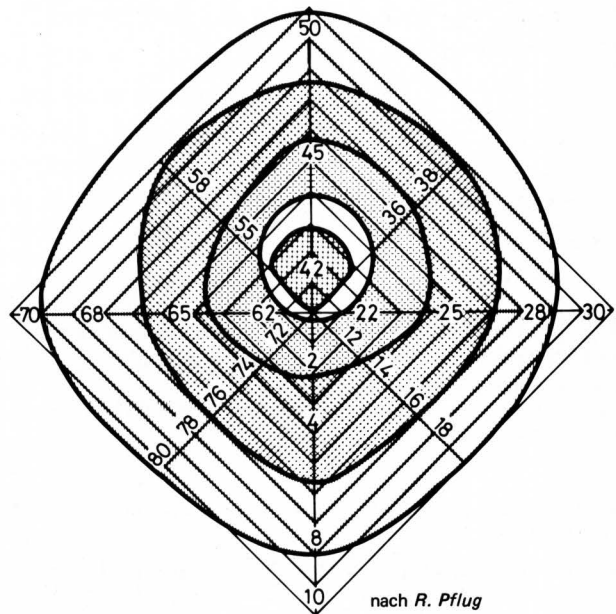
Die Berechnung geht davon aus, daß bei den durch die Strahlerheizung vorhandenen Temperaturen des Bodens und der Luft Wärmeverluste entstehen, die Temperaturen sich aber nicht verändern, weil die Wärmeverluste durch die Heizung gedeckt sind. Diese Annahme ist berechtigt, da die der Berechnung zugrunde gelegten, in den Bildern 4 bis 7 dargestellten Temperaturprofile die stationären Zustände nach 4 h Heizzeit wiedergeben.



**Bild 4.** Im Labor ermittelte Temperaturverteilung am Boden bei Heizung durch Flüssiggas-Infrarotstrahler.

Höhe des Strahlers über dem Boden 0,60 m; max. Leistung 1,28 kW, Werte von 80 Meßpunkten auf einer Fläche von  $1\text{ m}^2$

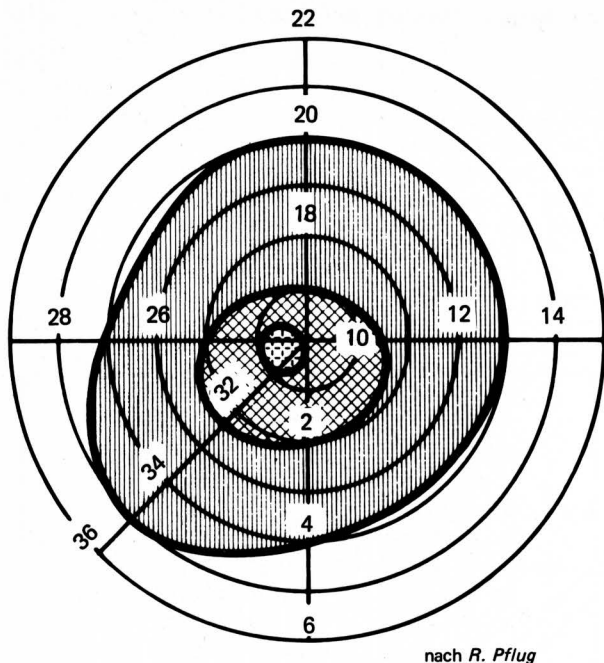
	35–38 °C		23–25 °C
	31–34 °C		< 22 °C
	26–30 °C		



**Bild 5.** Im Labor ermittelte Temperaturverteilung am Boden bei Heizung durch Flüssiggas-Infrarotstrahler.

Höhe des Strahlers über dem Boden 0,60 m; Leistung gedrosselt auf 550 W, Meßfläche  $1\text{ m}^2$

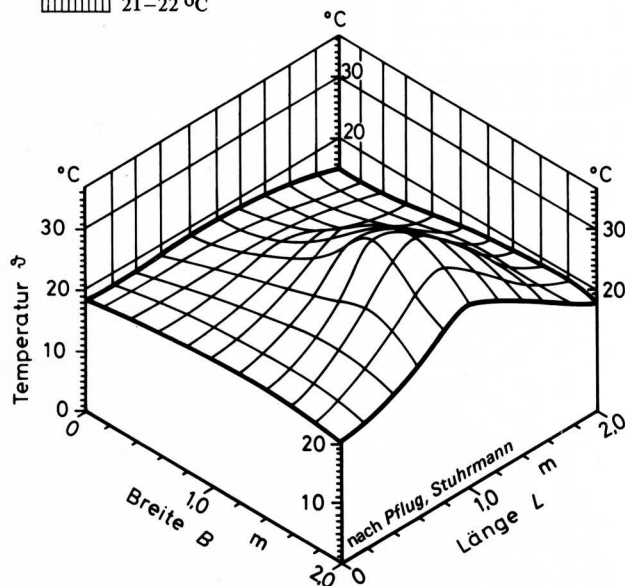
	35–36 °C		23–25 °C
	31–34 °C		21–22 °C
	26–30 °C		



**Bild 6.** Im Labor ermittelte Temperaturverteilung am Boden bei Heizung durch Elektro-Infrarotstrahler.

Höhe des Strahlers über dem Boden 0,50 m; Anschlußleistung 250 W; Runde Meßfläche von 1,2 m Durchmesser mit 36 Meßpunkten

- 26–30 °C
- 23–25 °C
- 21–22 °C



**Bild 7.** Am Boden einer Abferkelbucht ermitteltes Temperaturprofil bei Heizung mit einem Flüssiggas-Infrarotstrahler.

Buchtenabmessungen: Breite 2 m, Länge 2 m.  
Höhe des Strahlers über dem Boden 0,60 m; Meßpunktabstand 0,10 m; Raumtemperatur 15 °C.

#### 2.2.1.1 Berechnung des Konvektionswärmestromes

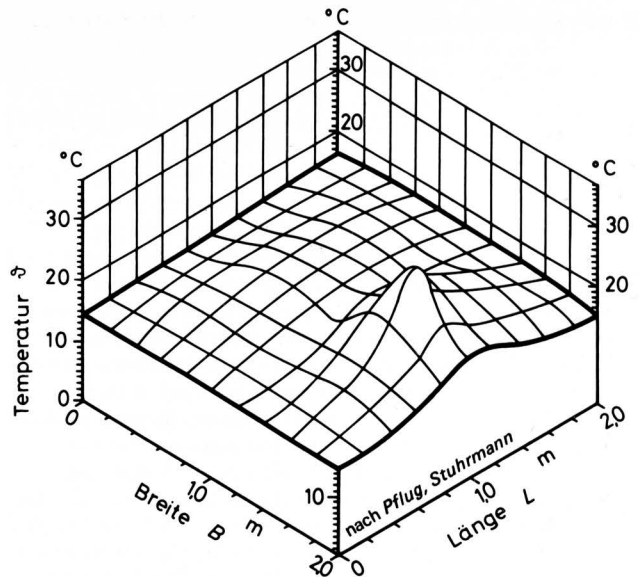
Die Berechnung geschieht in gleicher Weise wie unter 2.1.3 doch mit den geänderten Werten für:

$$\vartheta_L = 20 \text{ °C}; \quad \vartheta_B = 30 \text{ °C}$$

$$\vartheta_{St} = 0,5 (\vartheta_B + \vartheta_L) = 0,5 (30 \text{ °C} + 20 \text{ °C}) = 25 \text{ °C}$$

$$Pr = 0,7115; \quad \nu = 15,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Das Ergebnis der Rechnung ist  $a_K = 3,28 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Die Berechnung von  $\dot{Q}$  kann hier entfallen, da für die weiteren Betrachtungen wegen der Gleichheit der Fläche nur der Wert von  $a$  interessiert.



**Bild 8.** Am Boden einer Abferkelbucht ermitteltes Temperaturprofil bei Heizung mit einem Elektro-Infrarotstrahler.

Buchtenabmessungen: Breite 2 m, Länge 2 m  
Höhe des Strahlers über dem Boden 0,50 m; Meßpunktabstand 0,10 m; Raumtemperatur 15 °C.

#### 2.2.1.2 Berechnung des Strahlungswärmestromes

Die Berechnung ergibt mit den Werten:

$$\vartheta_W = 12 \text{ °C} \quad \vartheta_B = 30 \text{ °C} \quad \epsilon_B = 0,95$$

für den Wärmeaustausch durch Strahlung:

$$a_{Str} = 5,49 \text{ W/m}^2\text{K}.$$

#### 2.2.1.3 Berechnung des Wärmestromes infolge Wärmeleitung

Der Wärmestrom durch Leitung in Richtung einer Raumkoordinate läßt sich angenähert mit der Beziehung

$$\dot{Q}_L = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A(\vartheta_B - \vartheta_E)$$

bestimmen. Der Bodenaufbau ist der gleiche wie der für das Kontrollsystem "Tier", so daß in die Gleichungen nur die veränderten Temperaturen einzusetzen sind.

$$A = 0,05 \text{ m}^2 \quad \vartheta_B = 30 \text{ °C}$$

$$l = 0,5 \text{ m} \quad \vartheta_E = 10 \text{ °C}$$

$$\dot{Q}_{Lz} = 0,535 \text{ W} \quad \text{für die vertikale Richtung}$$

$$\dot{Q}_{L\pm y} = 0,1 \text{ W} \quad \text{horizontal, in Querrichtung}$$

$$\dot{Q}_{L\pm x} = 0,05 \text{ W} \quad \text{horizontal, in Längsrichtung.}$$

Insgesamt tritt eine Wärmeableitung einschließlich der weiteren Schichten von ungefähr 0,85 W auf.

#### 2.2.1.4 Ermittlung der Verluste aus der Kombination der Systeme einschließlich Heizung bzw. Tier

Die Wärmeverluste für das Tier ergeben sich mit der Heizung aus den Differenzen der Wärmeverluste beider Berechnungen. Dabei wird angenommen, daß die Wärmeverluste bei Einsatz des Strahlers ein Maß sind für die vom Strahler auf den Platz eines Ferkels eingebrachte Energie, die folglich von dem Ferkel nicht mehr aufgebracht werden muß. Für die Strahlung und die Konvektion genügt es, über die Differenz der  $a$ -Werte den verbleibenden Wärmeverlust für das Tier zu errechnen.

Bei der Wärmeleitung ist der Verlust als Differenz der Wärmeströme zu bestimmen. Hieraus folgt für das Gesamtsystem Gasstrahlerheizung – Tier:

$$\dot{Q}_{\text{Str}} = A (a_{\text{StrF}} - a_{\text{StrS}}) \cdot (\vartheta_{\text{H}} - \vartheta_{\text{W}}) = 0,384 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{K}} = A (a_{\text{KF}} - a_{\text{KS}}) \cdot (\vartheta_{\text{H}} - \vartheta_{\text{U}}) = 1,136 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{L}} = \dot{Q}_{\text{LF}} - \dot{Q}_{\text{LS}} = 0,165 \text{ W}$$

Der Wert für  $\vartheta_{\text{U}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , der hier eingesetzt wurde, ist gerechtfertigt, da das Heizsystem diese Umgebungstemperaturen erreicht, wie Messungen ergaben auch dann, wenn die beheizte Fläche mit Tieren belegt ist.

Für das angenommene Kontrollsystem "Tier" bleiben bei dieser Form der Heizung noch insgesamt  $\approx 2 \text{ W}$  als Verlust übrig, die also von der Heizung nicht gedeckt werden können. Das Temperaturregulationsvermögen des Tieres bleibt unberücksichtigt, das gilt auch für die Berechnung der beiden anderen Heizsysteme.

## 2.2.2 Elektro-Infrarotstrahlerheizung

Ausgangspunkt der Berechnung ist der in Bild 6 und 8 dargestellte Zusammenhang.

### 2.2.2.1 Berechnung für den Konvektionswärmestrom

Mit den Werten:

$$\vartheta_{\text{L}} = 17 \text{ }^\circ\text{C} \quad \vartheta_{\text{B}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_{\text{St}} = 0,5 (\vartheta_{\text{B}} + \vartheta_{\text{L}}) = 0,5 (25 + 17) = 21 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta\vartheta = 8 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Pr} = 0,7112 \quad \nu = 15,20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

ergibt sich ein Wert von  $a_{\text{K}} = 3,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

### 2.2.2.2 Berechnung für den Strahlungswärmestrom

Ein Ansatz mit den Größen:

$$\vartheta_{\text{W}} = 12 \text{ }^\circ\text{C} \quad \vartheta_{\text{B}} = 25 \text{ }^\circ\text{C} \quad \epsilon_{\text{B}} = 0,95$$

führt auf

$$a_{\text{Str}} = 5,34 \text{ W/m}^2\text{K}.$$

### 2.2.2.3 Berechnung der Wärmeleitung

Eine Rechnung mit den für den Bodenaufbau nach Bild 2 früher angegebenen Daten und mit

$$\vartheta_{\text{B}} - \vartheta_{\text{E}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_{\text{E}} = 12 \text{ }^\circ\text{C} \quad l = 0,5 \text{ m}$$

ergibt die Wärmeströme infolge Wärmeleitung

$$\dot{Q}_{\text{LZ}} = 0,401 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{L}\pm\text{y}} = 0,072 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{L}\pm\text{x}} = 0,0364 \text{ W}$$

Die weiteren Wärmeströme durch Leitung sind sehr klein, so daß insgesamt mit  $\dot{Q}_{\text{L}} = 0,65 \text{ W}$  zu rechnen ist.

### 2.2.2.4 Berechnung der Wärmeströme des Gesamtsystems Elektrostrahlerheizung – Tier

$$\dot{Q}_{\text{Str}} = A (a_{\text{StrF}} - a_{\text{StrE}}) \cdot (\vartheta_{\text{H}} - \vartheta_{\text{W}}) = 0,744 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{K}} = A (a_{\text{KF}} - a_{\text{KE}}) \cdot (\vartheta_{\text{H}} - \vartheta_{\text{U}}) = 1,653 \text{ W} \quad \text{mit } \vartheta_{\text{U}} = 17 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{\text{L}} = \dot{Q}_{\text{LF}} - \dot{Q}_{\text{LE}} = 1,0 - 0,65 = 0,35 \text{ W}$$

Für das angenommene Kontrollsystem "Tier" bleiben bei dieser Form der Heizung noch insgesamt  $2,75 \text{ W}$  als Verlust übrig, die vom Heizsystem nicht gedeckt werden.

Speziell zu dieser Heizung ist aber zu bemerken, daß bei einer Gesamtbetrachtung die Größe der beheizten Fläche einzubeziehen ist, und hier ist die Heizfläche (s. Bild 6) relativ klein.

## 2.2.3 Fußbodenheizung

Für eine Berechnung der Wärmeströme bei diesem Heizsystem sind vorab einige Randbedingungen anzugeben.

1. Temperatur an der Bodenoberfläche bei diesem Heizsystem  $36 \text{ }^\circ\text{C} = \vartheta_{\text{H}}$  (Hauttemperatur des Tieres), damit also ist ein Wärmeleitungsstrom in den Boden vom Tier aus nicht mehr möglich.
2. Die Heizfläche beträgt  $0,6 \text{ m}^2$  und ist zunächst von keinem Tier belegt.
3. Die Heizfläche ist außerhalb der beheizten Fläche von  $0,6 \text{ m}^2$ , sowohl seitlich als auch nach unten hin isoliert, so daß keine wesentliche Aufheizung des äußeren Bereiches erfolgt, dabei ist die Isolation des Bodens so ausgeführt wie für die beiden anderen Heizsysteme.

Es ergeben sich für die gesamte Heizfläche der Fußbodenheizung die im folgenden berechneten Wärmeströme.

### 2.2.3.1 Strahlungswärmestrom

Da die gleichen Temperaturen vorliegen wie für das Kontrollsystem "Tier", können die gleichen  $a$ -Werte angenommen werden, so daß in die Berechnung nur die größere Fläche eingeht.

$$\dot{Q}_{\text{Str}} = 5,65 \cdot 0,6 \cdot (36 - 12) = 81,36 \text{ W}$$

### 2.2.3.2 Konvektionswärmestrom

Hierfür gilt die oben erwähnte Vereinfachung nicht, da die Flächengröße auch den  $a$ -Wert verändert. Zunächst soll die Berechnung des Gesamtwärmeverlustes des Heizungssystems ohne Tierbelegung erfolgen.

Es ist somit die entsprechende Nusselt-Zahl erst zu ermitteln.

Mit den Stoffwerten

$$\vartheta_{\text{L}} = 15 \text{ }^\circ\text{C} \quad \vartheta_{\text{B}} = 36 \text{ }^\circ\text{C} \quad b = 0,5 \text{ m}$$

$$\vartheta_{\text{St}} = 25,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad \nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

ergibt sich für die Grashof-Zahl

$$\text{Gr} = 3,83 \cdot 10^8, \quad \text{Pr} = 0,7115$$

$$\text{Gr} \cdot \text{Pr} = 2,73 \cdot 10^8.$$

Für die Bestimmung der Nusselt-Zahl ist eine Beziehung mit einem Gültigkeitsbereich  $\text{Gr} \cdot \text{Pr} > 10^8$  anzuwenden. Diese ist mit guter Näherung:

$$\text{Nu} = 0,135 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{1/3} = 87,5$$

$$a = 4,43 \text{ W/m}^2\text{K}.$$

Für die gesamte beheizte Fläche ist

$$\dot{Q}_{\text{KFu}} = 55,8 \text{ W}.$$

### 2.2.3.3 Wärmeleitungsstrom

Hier können wieder die Gleichungen des Kontrollraums "Tier" verwendet werden, wobei nur die größeren Flächen zu berücksichtigen sind und die Tatsache, daß auch in tieferen Schichten eine seitliche Wärmeableitung auftritt. Unter Anwendung der Gleichungen, ergeben sich folgende Werte

$$\dot{Q}_{\text{Lz}} = 8,5 \text{ W}$$

	1. Schicht	2. Schicht	3. Schicht	4. Schicht
$\dot{Q}_{\text{L}\pm\text{y}}$	1,68 W	0,9 W	1,09 W	0,69 W
$\dot{Q}_{\text{L}\pm\text{x}}$	2,92 W	1,88 W	1,81 W	1,15 W

Der gesamte Wärmestrom durch Leitung beträgt  $20,62 \text{ W}$ .



Der gesamte Wärmestrom, den dieses Heizsystem abgibt, beträgt

$$\dot{Q}_{\text{ges}} = \dot{Q}_{\text{Str}} + \dot{Q}_{\text{K}} + \dot{Q}_{\text{L}} = 157,8 \text{ W.}$$

Oder bezogen auf die Fläche von  $0,1 \text{ m}^2$ , die zuvor für ein Ferkel angesetzt wurde:

$$\dot{Q} = 26,3 \text{ W.}$$

Die Frage stellt sich nun, welcher Anteil dieses Wärmestroms bei einer Kombination mit dem Kontrollraum "Tier" dessen Verluste nutzbringend für das Tier kompensieren kann.

#### 2.2.3.4 Berechnung der Wärmeströme des Gesamtsystems Fußbodenheizung – Ferkel

Da die Oberflächentemperatur der Fußbodenheizung gleich der Hauttemperatur des Tieres ist, können die Verluste durch Wärmeleitung aus dem Kontrollraum "Tier" vollkommen von der Heizung gedeckt werden. Das gilt auch für ein Tier, das am Rande der Heizfläche liegt. Die Wärmeströme der Strahlung und der Konvektion sind noch zu ermitteln, denn diese werden nur zum Teil kompensiert.

Für ein Tier, welches am Rande der Heizfläche liegt, ist unter den angegebenen Bedingungen eine Kompensation des konvektiven Wärmestromes nicht möglich, da der Luft von außen her keine wesentliche Aufheizstrecke zur Verfügung steht, bevor sie das Tier erreicht; denn ein starker seitlicher Wärmetransport aus der Heizfläche muß verhindert werden, weil sonst wiederum eine zu hohe Leistung zu installieren ist.

Für den Fall der Wärmestrahlung kann allerdings davon ausgegangen werden, daß ein geringer Strahlungsaustausch von der Heizfläche zum Tier hin erfolgt. Für ein am Rand der Heizfläche liegendes Tier ist diese Möglichkeit in Bild 9 dargestellt. Es ist dabei ein Strahlungsaustausch unter dem Winkel von 25 Grad zwischen der restlichen Heizfläche und etwa einem Drittel der freien Oberfläche des Tieres ( $0,1 \text{ m}^2$ ) vorhanden. Somit nehmen ca.  $0,033 \text{ m}^2$  der Tieroberfläche am Strahlungsaustausch teil, bei dessen Bestimmung die Winkel und Flächenverhältnisse zu berücksichtigen sind.

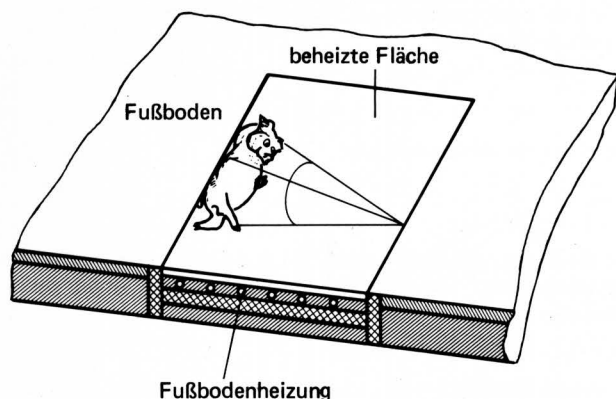


Bild 9. Strahlungsaustausch zwischen Tier und Heizfläche bei einer Fußbodenheizung.

Mit dem Wert  $\alpha_{\text{Str}} = 5,65 \text{ W/m}^2\text{K}$  und einer Einstrahlzahl von 0,6 ergibt sich  $\dot{Q}_{\text{Str}} = 2,68 \text{ W}$ . Insgesamt werden durch die Bodenheizung im Kontrollraum "Tier" der Wärmestrom  $\dot{Q}_{\text{L}}$  vollständig,  $\dot{Q}_{\text{Str}}$  teilweise ausgeglichen.

$$\dot{Q}_{\text{L}} = 1,0 \text{ W; } \dot{Q}_{\text{Str}} = 2,68 \text{ W.}$$

Für das Kontrollsystem Tier bleibt dabei unter den angegebenen Bedingungen noch ein Wärmestrom von  $20,3 \text{ W}$  als Verlust vorhanden. Dieses gilt nicht für das gesamte Heizungssystem, sondern nur für den Grenzfall. Es bedeutet aber, daß bei großen Würfen ( $> 10$  Ferkel) dieses Heizungssystem nicht ausreicht, denn bei einer vollständigen Belegung der beheizten Fläche ist ein Wärmeaustausch zwischen Heizung und Tier über die Strahlung oder

Konvektion nicht möglich, so daß nur die Wärmeleitung wirksam wird. Es ist jedoch nicht möglich, über die Wärmeleitung des Tierkörpers die Wärmeverluste infolge Strahlung und Konvektion voll zu decken, auch wenn durch eine größere Leistung der Heizung die Temperaturen der beheizten Flächen erhöht werden können, so daß eine verstärkte Wärmeleitung in das Tier eintreten kann.

### 3. Vergleich der verschiedenen Heizungsarten

#### 3.1 Wirksamkeit der Heizungen für das Tier

Ein Tier, das unter den Bedingungen, wie sie für den Kontrollraum "Tier" angenommen wurden, gehalten wird, erleidet den Verlust eines stündlichen Wärmestromes von  $23,0 \text{ W}$ . Bei dem Einsatz der verschiedenen Heizungen treten dann noch die folgenden Verluste auf:

Flüssiggas-Infrarotstrahlerheizung	2 W
Elektro-Infrarotstrahlerheizung	2,75 W
Fußbodenheizung	20,3 W

Diese Verluste beziehen sich natürlich immer auf die angegebenen Randbedingungen. Dabei ist festzustellen, daß für die Elektro-Infrarotstrahlerheizung eine günstigere Annahme vorlag als für die Fußbodenheizung. Dieses ist für den Vergleich zunächst notwendig, um die komplizierten Vorgänge des Wärmeaustausches zu beleuchten. Für einen exakteren Vergleich sind die von den einzelnen Systemen beheizten Flächen zu betrachten, wobei darauf zu achten ist, für welche Bereiche die aus den Rechnungen ermittelten Werte zutreffen.

Für die Flüssiggas-Infrarotstrahlerheizung haben die Werte eine Gültigkeit für einen Bereich von  $0,7 \text{ m}^2$ , darüber hinaus aber auch noch annähernd auf einer weiteren Fläche von  $0,3 \text{ m}^2$ , wengleich hier die Wärmeverluste eines Tieres um 100 % steigen. Auf der Fläche von  $1 \text{ m}^2$  kann daher für alle dort liegenden Tiere nur ein Wärmeverlust um  $4 \text{ W/Tier}$  erwartet werden.

Bei der Elektro-Infrarotstrahlerheizung ist die beheizte Fläche wesentlich kleiner, so daß hier die berechneten optimalen Verhältnisse nicht auf eine  $1 \text{ m}^2$  Fläche übertragen werden können, denn der Temperaturabfall vom optimalen Bereich nach außen ist sehr groß, s. Bild 8. Eine Berechnung für diese größere Fläche ist sehr mühsam, eine Abschätzung ergibt, daß außerhalb einer mittleren Zone von  $0,5 \text{ m}^2$  die Verhältnisse denen der Fußbodenheizung gleichen. Im Mittel kann daher angenommen werden, daß die Tiere auf  $1 \text{ m}^2$  Fläche bei der Elektro-Infrarotstrahlerheizung etwa  $8-10 \text{ W/Tier}$  an Wärmeverlust erleiden.

Bei der Fußbodenheizung haben die errechneten Werte für den Rand einer  $0,6 \text{ m}^2$  großen Fläche Geltung. Für den inneren Bereich sind die Werte für den Wärmeverlust eines Tieres zu hoch angesetzt, vor allem wenn man bedenkt, daß bei einer installierten Leistung von  $200 \text{ Watt}$  und errechneten Verlusten von nur  $158 \text{ W}$  die Temperatur über  $36 \text{ }^\circ\text{C}$  ansteigen müßte und somit ein Wärmeübergang vom Boden zum Tier hin erfolgen könnte.

Für eine exakte Berechnung ist ein hoher Aufwand nötig, so daß auch in diesem Fall eine Abschätzung vom ermittelten Wert aus vorgenommen wird. Eine solche Abschätzung genügt für diesen Vergleich der Heizungsarten, da die Werte für die einzelnen Heizungen nicht so eng beieinanderliegen und damit auch für die exakten Verhältnisse eine Überdeckung nicht gegeben ist. Bezieht man darüber hinaus die Werte auf die mit dem Flüssiggas-Infrarotstrahler vergleichbare Fläche von  $1 \text{ m}^2$ , so muß man feststellen, daß die im Beispiel für die Fußbodenheizung ermittelten Werte außerhalb der Fläche von  $0,6 \text{ m}^2$  auch nicht erreicht werden.

Im Mittel dürfte daher ein auf einer durch Fußbodenheizung (Heizfläche  $0,6 \text{ m}^2$ ) aufgeheizten Fläche von  $1 \text{ m}^2$  liegendes Tier einen Wärmeverlust von  $15-21 \text{ W}$  aufweisen.

Der Vergleich bringt also den Nachweis, daß die durch die Flüssiggas-Infrarotstrahlerheizung zur Verfügung stehende Wärme für das Tier die günstigsten Bedingungen bringt, da der Gesamt-Wärmeverlust des Tieres auf  $9-17 \%$  gesenkt werden kann. Die beiden anderen Systeme, Elektro-Infrarotstrahler auf  $34-52 \%$  und die Fußbo-

denheizung auf 66–90 %, erreichen eine Herabsetzung der Wärmeverluste, die aber keineswegs den Ansprüchen neugeborener Tiere gerecht wird. Die aufgezeigten Verhältnisse verbessern sich entsprechend, wenn die Höhe des Temperaturanspruches des Tieres sich verringert, zugunsten der Elektro-Infrarotstrahler und auch der Fußbodenheizung. Mit zunehmendem Alter der Tiere ist eine Temperaturabsenkung möglich, so daß dann die Vorteile der Flüssiggas-Infrarotstrahlerheizung nicht mehr so deutlich sichtbar sind. Dennoch ist eine Flüssiggas-Infrarotstrahlerheizung auch für diesen Bereich begünstigt, da durch die Regelung der Gaszufuhr die Energiezufuhr gedrosselt werden kann und damit eine Temperaturabsenkung ermöglicht wird. Neben dieser theoretischen Berechnung der Vorzüglichkeit des Wärmeangebotes der verschiedenen Systeme ist eine Kostenrechnung notwendig, die dann auch die betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkte berücksichtigt.

### 3.2 Betriebswirtschaftlicher Vergleich

Ein Kostenvergleich ist bereits von *Berkner* und *Lorenz* [1] vorgenommen worden und soll hier nur in seiner Gesamtaussage wiedergegeben werden. In der Zusammenstellung, **Tafel 1**, sind sowohl die Investitionskosten als auch die Festkosten und die variablen Kosten gesondert ausgewiesen. Die Investitionskosten sind pro Abferkelbucht und die variablen bzw. festen Kosten pro Wurf berechnet worden. Die festgestellten Gesamtkosten/Wurf = (Festkosten und variable Kosten)/ Wurf weisen für die Elektro-Fußbodenheizung den niedrigsten Betrag von 21, 81 DM aus, während die Flüssiggas-Infrarotstrahler mit 29,96 DM niedriger liegen als die Elektro-Infrarotstrahler, welche 30,08 DM aufweisen.

Kosten	Flüssiggas-Infrarotstrahler		Elektro-Infrarotstrahler			Elektro-Bodenheizung			
I. Investitionskosten pro Bucht	Strahler (1 395 Watt)	120,-		Haltegerät	25,-		Heizmatte (180 Watt)	85,-	
	Tank 1,2 t (Preis 2500,-)	125,-		Fassung und Schutzkorb			Intervallsch.	45,-	
	Montage	80,-		Lampe (250 Watt)	15,-		Ferkelkiste	50,-	
	Gesamt:	325,- DM		Montage	30,-		Montage	55,-	
			Gesamt:	70,- DM		Gesamt:	235,- DM		
II. Festkosten pro Wurf		DM/ Jahr	DM/ Wurf		DM/ Jahr	DM/ Wurf		DM/ Jahr	DM/ Wurf
1. A f A	Strahler und Montage	20,-	3,03	Fassung	5,-	0,76	Gesamte Einricht.	23,50	3,56
2. Wartung und Pflege	Tank	6,25	0,95	Montage Lampe	3,-	0,45			
	3 % d. Inv. kosten für Str. u. Mont.	6,-	0,91	3 % der Montagekosten	0,90	0,14	2 % der Ges. Inv. kosten	5,-	0,76
	TÜV Tank alle 2 Jahre (100,- DM)	2,50	0,38						
3. 5 % Zinsanspruch auf die Investitionskosten		16,25	2,46		3,50	0,53		12,50	1,89
	Gesamt:		7,73	Gesamt:		4,88	Gesamt:		6,21
III. Variable Kosten pro Wurf	Gasverbrauch: 3 Tage max. = 92 g/h 25 Tage min. = 46 g/h 34,2 kg Propan x 0,65 DM/kg			Verbrauch el. Energie: 250 W 6 kWh/Tag 168 kWh in 28 Tagen x 0,15 DM/kWh			Verbrauch el. Energie: ø 150 W 3,6 kWh/Tag 104 kWh in 29 Tagen x 0,15 DM/kWh		
	Gesamt:	22,23 DM		Gesamt:	25,20 DM		Gesamt:	15,60 DM	
IV. Gesamtkosten pro Wurf = Festkosten und variable Kosten	29,96 DM			30,08 DM			21,81 DM		

**Tafel 1.** Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Heizungen nach *Berkner* und *Lorenz* [1].

		Flüssiggas-Infrarotstrahler	Elektro-Infrarotstrahler	Elektro-Bodenheizung
Verfügbare Leistung	W	700	250	150
Bez. Investitionskosten	$\frac{DM}{W \cdot Bucht}$	0,46	0,28	1,56
Bez. Gesamtkosten	$\frac{DM}{W \cdot Wurf}$	0,04	0,12	0,15

**Tafel 2.** Auf die verfügbare Leistung bezogene Kosten verschiedener Heizungen nach *Berkner* und *Lorenz* [1].

Betrachtet man aber die angebotene Leistung und damit auch die wärmetechnische Vorzüglichkeit der verschiedenen Heizungen, wie sie im vorhergehenden Teil des Beitrages dargelegt wurden, so ist nur eine auf diese Größe bezogene Rechnung aussagefähig. In **Tafel 2** sind daher die Werte für die Investitionskosten/Bucht und die Gesamtkosten/Wurf auf die mit der jeweiligen Heizung verfügbare Leistung bezogen. Hier zeigt sich dann auch ein betriebswirtschaftlich errechenbarer Vorteil für die Flüssiggas-Infrarotstrahlerheizung, bei der die Leistung von 1 Watt für 0,04 DM/Wurf in den Gesamtkosten zur Verfügung steht. Daß sich die höhere installierte Leistung gegenüber den anderen Systemen lohnt, hat der wärmeteoretische Vergleich bereits ergeben. Eine Untersuchung über die daraus erfolgte Verbesserung der Tierleistung und die damit verbundene Gewinnermittlung wären noch notwendig, um den Gesamtwirkungsgrad der Heizungen zu bestimmen. Dennoch kann gesagt werden, daß die Flüssiggas-Infrarotstrahlerheizung von den in der Praxis angewendeten Heizsystemen die für eine gezielte Anwendung der Wärmeenergie am besten geeignete Einrichtung ist, da hier die Wärme direkt dort hingebacht werden kann, wo sie tatsächlich benötigt wird, nämlich an die Körperteile des Tieres, die der Abkühlung am stärksten unterliegen. Dieses gilt sowohl für den Bereich der Schweine- als auch für die Kälberaufzucht und bei unterschiedlichen Wärmeansprüchen gemeinsam gehaltener Tiere (z.B. Zuchtsauen und Ferkel).

#### 4. Zusammenfassung

Die einstreulose Haltung von ferkelführenden Sauen in einem Abferkelstall bringt über die schon bei der konventionellen Haltung vorhandene negative Wärmebilanz hinaus für die Ferkel eine zusätzliche thermische Belastung, die nur durch eine geeignete Heizung kompensiert werden kann. Diese muß gezielt für den Ruhebereich der Ferkel eingesetzt werden wegen der unterschiedlichen Temperaturansprüche von Sauen und Ferkeln (Sauen um 15 °C, neugeborene Ferkel um 36 °C). Die bereits von *Pflug* und *Stuhrmann* durchgeführten Temperaturmessungen (Boden- und Lufttemperatur) bei den Flüssiggas- und Elektro-Infrarotstrahlerheizungen bilden die Grundlage der hier vorgestellten wärmeteoretischen Betrachtungen und Berechnungen. Die ermittelten Ergebnisse zeigen einen eindeutigen Vorteil von Strahlungsheizungen gegenüber der Fußbodenheizung, wobei die Flüssiggas-Infrarotstrahler von den hier betrachteten Systemen die günstigsten Werte sowohl wärmeteoretisch als auch von den Gesamtkosten her aufweisen. Damit ist auch die bereits durch die Studien von *Pflug* [5] auf dem Gebiet des Tierverhaltens nachgewiesene Vorzüglichkeit der Flüssiggas-Infrarotstrahler durch die wärmeteoretischen Berechnungen, hinsichtlich ihrer Effektivität und der leistungsbezogenen Kosten, bestätigt worden. Die hier durchgeführte grundlegende Berechnung der Wärmeströme ist durchaus übertragbar auf andere Bereiche der Tierhaltung wie z.B. die Kälberaufzucht.

#### Verwendete Formelzeichen

A	Fläche
A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub>	Strahlungsaustauschfläche
A <sub>AF</sub>	Aufliegefläche des Ferkels
A <sub>OF</sub>	freie Oberfläche des Ferkels

b	Breite
C <sub>s</sub>	Strahlungskonstante des schwarzen Körpers
g	Fallbeschleunigung
l	Länge
q̇	Wärmestromdichte
Q̇	Wärmestrom
T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub>	Kelvintemperatur im Strahlungsaustausch stehender Flächen
a	Wärmeübergangskoeffizient
β	Ausdehnungskoeffizient (Reziprokwert der Stofftemperatur)
δ	Schichtdicke
ε <sub>1</sub>	Emissionskoeffizient des Strahlers
ϑ	Celsiustemperatur
λ	Wärmeleitfähigkeit
ν	kinematische Viskosität
Indizes	
B	Boden
E	Elektro-Infrarotstrahler
E, E'	in Verbindung mit ϑ → Erdboden
F	Ferkel
Fu	Fußbodenheizung
H	Haut
K	Konvektion
L	Leitung (bei λ und ϑ: Luft)
S	Flüssiggas-Infrarotstrahler
St	Stoff
Str	Strahlung
W	Wand

#### Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] *Berkner, F. u. J. Lorenz*: Der Flüssiggas-Infrarotstrahler als Alternative zu herkömmlichen Heizsystemen im Abferkelstall. Flüssiggas-Dienst Heft 10, 1976.
- [ 2 ] • *Eckert, E.*: Wärme- und Stoffaustausch. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1966.
- [ 3 ] • *Kollmar, A. u. W. Liese*: Strahlungsheizung. 4. Auflage. München: R. Oldenbourg 1957.
- [ 4 ] • *Michejew, M.A.*: Grundlagen der Wärmeübertragung. Berlin: VEB-Verlag Technik 1962.
- [ 5 ] *Pflug, R.*: Geburtsverhalten von Sauen und Verhaltensweisen ihrer Ferkel in Abhängigkeit haltungs- und klimatechnischer Bedingungen neuzeitlicher Abferkelställe. Diss. Universität Gießen 1976.